Environnement Canada
Environment Canada

Élaboration d'un modèle de déversement d'hydrocarbures pour le Saint-Laurent

Mervin Fingas et Maurice Sydor

ÉTUDE N° 116, COLLECTION DES RAPPORTS TECHNIQUES

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES
DIRECTION DE LA PLANIFICATION ET DE LA GESTION (EAUX)
OTTAWA, CANADA, 1981

Canada

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1981

N° de cat En 36-503/116F
ISBN 0-662-91301-9

TABLE DES MATIÈRES

Page

Résumé/Abstract v

Liste des symboles vii

1. Introduction 1

2. Aspects et problèmes de la modélisation des déversements 1
   2.1 Micro- et macro-modèles 2
   2.2 Modèles en temps réel ou avec scénario 2
   2.3 Données d'entrée nécessaires 2
   2.4 Facteurs à inclure 2
   2.5 Vérification du modèle 3
   2.6 Description du milieu ou corrélation des observations 3
3. Comportement de base des hydrocarbures déversés dans l'environnement 5
   3.1 Étalement 5
   3.2 Déplacement avec le courant de surface 5
   3.3 Effet du vent 5
   3.4 Effet des marées 6
   3.5 Effet des vagues 6
   3.6 Effet des émulsions de l'eau dans les hydrocarbures 6
   3.7 Pertes d'hydrocarbures 7
   3.8 Variation des paramètres 7
4. Modèles courants 7
   4.1 Modèles d'étalement 7
      4.1.1 Modèle de Blokker 7
      4.1.2 Modèle de Fay 8
   4.2 Modèles de déplacement 9
      4.2.1 Modèle de base non associatif 9
      4.2.2 Modèles probabilistes 10
5. Élaboration du modèle de déversement pour le Saint-Laurent 10
   5.1 Simulation du régime du Saint-Laurent 10
   5.2 Modèle de simulation des déversements 12
   5.3 Considérations théoriques du modèle de Fay 12
   5.4 Comment le modèle représente-t-il le volume déversé? 16
   5.5 Effets des rives ou des limites existantes 17
   5.6 Effets aléatoires utilisés dans le modèle 18
   5.7 Simulation d'un déversement dans le port de Montréal 18
   5.8 Résultats et conclusions 24
6. Références 25

FIGURES

		Page
1	Schéma des modifications subies par les hydrocarbures dans le milieu marin	4
2	Schéma de la modélisation du déplacement d'une nappe d'hydrocarbures	6
3	Représentation graphique des vitesses dans le Saint-Laurent au lac St-Louis	11
4	Rayon de la nappe par rapport au temps pour un déversement soudain	15
5	Représentation graphique des vitesses dans le Saint-Laurent au port de Montréal	19
6-9	Évolution d'une nappe d'hydrocarbures dans le port de Montréal, à intervalles de 15 min	20-23

TABLEAU

1	Rayon de la nappe par rapport au temps pour un déversement soudain, Sommaire des données graphiques	14

Résumé

En modélisant le comportement d'une nappe d'hydrocarbures dans diverses conditions naturelles, l'homme apprend à mieux connaître son environnement. Le présent rapport étudie certains modèles élaborés jusqu'ici et traite de maints facteurs qui doivent être considérés pour prévoir l'évolution d'une nappe de pétrole brut à la surface de l'eau. Le rapport décrit ensuite les étapes requises pour élaborer un modèle d'un déversement simulé dans le Saint-Laurent.

Abstract

The use of modelling to simulate the behaviour of spilled hydrocarbons under varying natural conditions is improving man's understanding of his environment. This report reviews some of the history of oil spill modelling and discusses many of the factors that must be considered in plotting the behaviour of bunker crude oil on the water surface. The report then goes through the steps taken in developing an oil spill simulation model for the St. Lawrence River.

LISTE DES SYMBOLES

$A(m^2)$	-	surface de la nappe d'hydrocarbures en mètres carrés
Δ	-	rapport de densité huile/eau $(\rho_w - \rho_o) / \rho_w$
C_t	-	vitesse du vent dans la direction x au moment t.
G,g	-	accélération de la pesanteur: 32,2 pi/s^2 ou 9,8 m/s^2
K_B	-	constante d'étalement de Blokker pour un type d'hydrocarbures (min^{-1}) (environ 30 000 pour l'essence, 15 000 pour un brut léger et 10 000 pour l'huile de graissage)
K_{2i}	-	coefficient d'étalement initial dû à la gravité
K_{2v}	-	coefficient d'étalement visqueux
K_{2t}	-	coefficient d'étalement dû à la tension superficielle
L	-	Longueur d'une nappe rectangulaire (cm)
ρ_w	-	densité des hydrocarbures (g/cm^3)
ρ_o	-	densité de l'eau (g/cm^3)
r_i	-	rayon de la nappe pendant l'étalement initial dû à la gravité
r_v	-	rayon de la nappe pendant l'étalement visqueux
r_t	-	rayon de la nappe pendant l'étalement dû à la tension superficielle
R_{iv}	-	rayon théorique de la nappe au moment de la transition de l'étalement dû à la gravité à l'étalement visqueux
R_{vs}	-	rayon théorique de la nappe au moment de la transition de l'étalement visqueux à l'étalement dû à la tension superficielle
R_f	-	rayon stable final de la nappe
SG_o	-	poids spécifique des hydrocarbures
SG_w	-	poids spécifique de l'eau
t	-	durée du processus d'étalement (min)
T_{iv}	-	temps théorique de la transition de l'étalement dû à la gravité à l'étalement visqueux
T_{vs}	-	temps théorique de la transition de l'étalement visqueux à l'étalement dû à la tension superficielle
T_f	-	temps de stabilisation
V	-	volume des hydrocarbures déversés (cm^3) (généralement initial ou à un moment donné)
W	-	largeur d'une nappe rectangulaire (cm) limitée à la largeur W d'un chenal étroit
W_t	-	vitesse de l'eau dans la direction x au moment t
X_t	-	vitesse vectorielle d'une nappe dans la direction x au moment t
ν	-	viscosité cinématique de l'eau
ρ	-	densité des hydrocarbures
δ	-	coefficient d'étalement
π	-	constante pi
Q_t	-	diamètre de la nappe au moment t (cm)

1. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, de nombreux chercheurs ont modélisé les déversements d'hydrocarbures[1, 4-11] par suite du nombre élevé de ces accidents et à cause de leurs effets sur les milieux marins et littoraux. En outre, pour élaborer les modèles, ils pouvaient se servir de données sur le comportement des hydrocarbures sur l'eau qui n'existaient pratiquement pas il y a 10 ans. Il est maintenant possible de choisir entre un grand nombre de méthodes pour élaborer un modèle mathématique des hydrocarbures sur l'eau.

Jusqu'ici, les modèles avaient été élaborés pour répondre à certains besoins: entre autres, prévoir le déplacement des hydrocarbures, déterminer les répercussions possibles d'un déversement, établir des plans de lutte ainsi que des priorités dans le cas d'un déversement ou identifier le meilleur emplacement pour des installations comme les ports pétroliers. Ces dernières années, la modélisation a pu se faire en temps réel, c'est-à-dire s'appliquer pendant un déversement, tant pour prévoir le déplacement de la nappe un certain temps à l'avance que pour en confirmer les positions immédiates.

À l'heure actuelle, de nombreux scientifiques remettent en question l'applicabilité de certains modèles, leur validité, etc. Après avoir étudié de manière approfondie le pour et le contre, les auteurs en ont déduit que nombre des problèmes sont attribuables simplement au fait que beaucoup des modèles sont conçus pour des situations et des besoins précis. On estime que le meilleur modèle est celui qui établit des prévisions réalistes et qui est le mieux adapté aux besoins de l'utilisateur final.

2. ASPECTS ET PROBLÈMES DE LA MODÉLISATION DES DÉVERSEMENTS

Quiconque entreprend d'élaborer un modèle de déversement d'hydrocarbures doit immédiatement déterminer les inconnues suivantes:

a. besoins de l'utilisateur final;
b. situation géographique dans laquelle le modèle sera utilisé;
c. nombre de données d'entrée disponibles;
d. degré de précision exigé par l'utilisateur final;
e. nombre et type de paramètres de sortie requis par l'utilisateur final;
f. utilisation qui sera faite du modèle.

On estime que les doutes formulés à l'endroit de la modélisation des déversements dans son ensemble sont dus au fait qu'on n'a pas su adapter les modèles à la situation et aux besoins de l'utilisateur final. La plupart des études dans ce domaine ont servi davantage à comparer des situations plutôt que les avantages d'une méthode par rapport à une autre. Il est important d'examiner certains problèmes que l'on néglige souvent de considérer au stade de conception du modèle.

2.1 Micro- et macro-modèles

La plupart des modèles peuvent être placés dans l'une ou l'autre de ces catégories.

Les micro-modèles s'appliquent à des zones géographiques limitées, par exemple, un port, une baie ou un cours d'eau, et se caractérisent par un nombre relativement élevé de données d'entrée très exactes. On exige généralement d'eux des prévisions pour plusieurs milles ou plusieurs heures au grand maximum, de sorte que le degré d'exactitude exigé est d'ordinaire élevé. Les macro-modèles sont utilisés à une échelle plus grande, par exemple la totalité des eaux littorales d'un pays. En règle générale, ils sont conçus pour prévoir les influences du vent et des courants sur une nappe avec nettement moins de données d'entrée que les micro-modèles. Le degré d'exactitude des prévisions exigé est nettement inférieur pour ces modèles. En général, il ne sert à rien de comparer dans le détail les deux types de modèles du fait qu'il existe de grandes différences d'un modèle à l'autre. Il est probable que les facteurs physiques qui influent sur les déversements sont les mêmes dans les deux cas; toutefois, la méthode d'obtention des données d'entrée relatives au courant et au vent, le traitement des données et la précision des modèles qui en résulte sont souvent totalement différents.

2.2 Modèles en temps réel ou avec scénario

Des opinions diverses ont été formulées quant au choix de l'un ou l'autre de ces modèles. Apparemment, ce choix devrait être guidé par le logiciel et le matériel informatiques disponibles, la préférence ou les besoins de l'utilisateur et le nombre des données recueillies. Il est probable qu'un modèle de l'un ou l'autre type serait identique pour la même région ou situation.

2.3 Données d'entrée nécessaires

Ces dernières années, les chercheurs ont beaucoup discuté du nombre de renseignements sur les courants et les vents qui sont nécessaires pour un modèle. Il ne s'agit peut-être pas tant de savoir quel est le minimum mais plutôt quelles données sont disponibles et accessibles. Il semble qu'un chercheur disposera toujours d'un nombre de données qu'il considère insuffisant et s'efforcera donc d'en tirer parti au mieux. Il s'agit en fait de savoir si l'on dispose d'un nombre suffisant de données dans un cas particulier pour que la modélisation soit valable. On devra probablement faire face à de telles situations dans le cas de certaines régions arctiques pour lesquelles il n'existe pas de données sur les vents et les courants et où, avec ou sans modèles, le déplacement d'une nappe d'hydrocarbures relève de la pure spéculation.

2.4 Facteurs à inclure

Un grand nombre de spécialistes ont prétendu au cours des dernières années qu'un modèle de déversement n'était pas complet s'il ne tenait pas compte de facteurs comme

l'évaporation, la dissolution, la sédimentation, la dispersion, etc. On ne peut contester le bien-fondé de cette opinion. Toutefois, si l'utilisateur final ne veut connaître les déplacements de la nappe que sur une courte distance ou pendant une courte période, ces facteurs "supplémentaires" ne lui sont guère utiles et augmentent le coût et la difficulté d'élaboration et d'utilisation du modèle.

Dans de nombreux cas, on exigera simplement d'un modèle qu'il détermine approximativement quel sera le déplacement d'un volume X d'hydrocarbures déversés dans des conditions environnementales données, sa destination et combien de temps il lui faudra pour s'y rendre.

La prise en considération de facteurs comme l'évaporation prend une grande importance dans les macro-modèles où il s'écoule suffisamment de temps entre un déversement et l'arrivée de la nappe à une destination donnée pour que les résultats puissent varier considérablement, par exemple, si 50 % des produits s'évaporent dans l'intervalle considéré.

2.5 Vérification du modèle

Jusqu'ici, l'inconvénient le plus grave de la plupart des modélisations est qu'un très petit nombre seulement des nombreux modèles élaborés ont été confrontés avec des déversements réels, comme l'a révélé une étude[1]. En outre, la plupart de ceux-ci ont été vérifiés longtemps après les déversements qui ont servi à les vérifier. On pourrait contester la validité de ce type de "rétro-prévision" car les données sur un grand nombre de ces déversements étaient insuffisantes.

Les auteurs avancent qu'un modèle doit surtout être capable de prévoir les situations réelles. La vérification devrait alors faire partie de la conception du modèle. Cela ne s'est pas produit jusqu'ici essentiellement pour deux raisons: le manque de communication entre les responsables des opérations et la communauté scientifique et l'absence d'outils permettant de tester les modèles à l'aide de déversements non réels. Ce dernier problème est résolu étant donné qu'on peut maintenant suivre les nappes grâce à des bouées ou des bouts de carton[2].

2.6 Description du milieu ou corrélation des observations

La modélisation a été effectuée de deux façons différentes: l'une à partir des descriptions de base du milieu permettant d'élaborer des descriptions mathématiques du comportement du milieu naturel (théorique) et l'autre par corrélation des observations relatives au comportement des hydrocarbures dans le milieu naturel avec des facteurs comme le vent et les courants (empirique). À cet égard, nombre de modèles actuels sont mixtes. On estime qu'il s'agit avant tout de savoir si un modèle peut vraiment prévoir le comportement d'une nappe d'hydrocarbures. En outre, la complexité de la situation ne

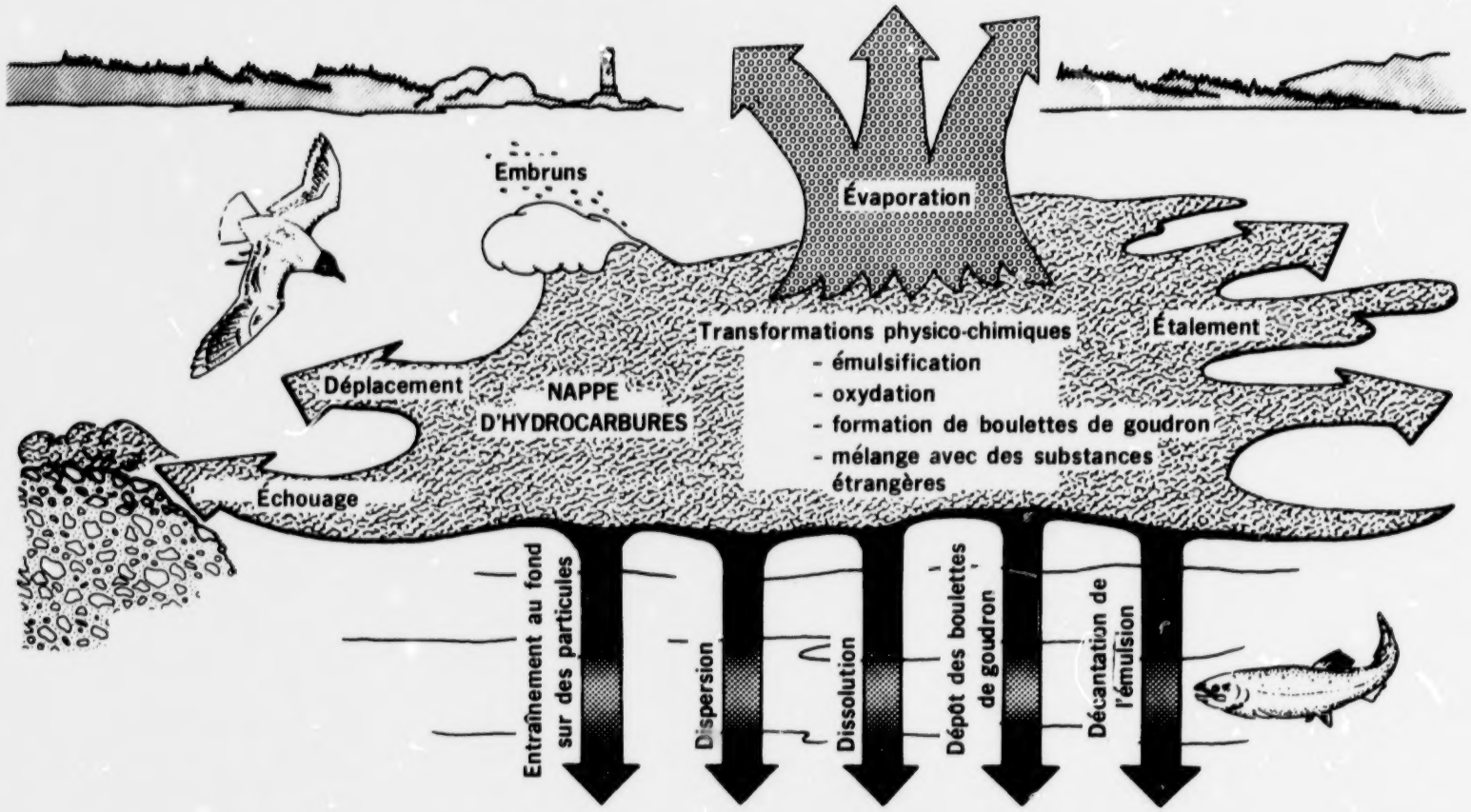

Figure 1. Schéma des modifications subies par les hydrocarbures dans le milieu marin.

permet pas pour le moment d'élaborer un modèle complet exclusivement à partir de principes fondamentaux.

3. COMPORTEMENT DE BASE DES HYDROCARBURES DÉVERSÉS DANS L'ENVIRONNEMENT

La présente section examinera les problèmes de base du comportement d'un déversement d'hydrocarbures dans l'environnement. Supposons que l'on puisse dissocier les forces agissant sur les hydrocarbures déversés, les décrire puis les réunir à nouveau pour reconstituer le comportement de ces derniers. La figure 1 illustre certains comportements des hydrocarbures dans l'environnement.

3.1 Étalement

À la surface de l'eau, les hydrocarbures s'étalent rapidement pour former une nappe de quelques millimètres d'épaisseur seulement. La vitesse d'étalement dépend beaucoup des propriétés des hydrocarbures ainsi que de la température à la surface de l'eau. Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire l'étalement, ainsi qu'on le verra ci-après.

3.2 Déplacement avec le courant de surface

En principe, une nappe se déplace à la même vitesse que l'eau qu'elle recouvre. Toutefois, il est très difficile de mesurer la vitesse du courant de surface étant donné que la couche d'eau supérieure n'est pas suffisamment épaisse (par exemple, 1 cm) pour des courantomètres ordinaires. Néanmoins, des bouts de carton, etc. ont été employés pour mesurer cette vitesse.

De manière plus caractéristique, on se sert des mesures existantes de la vitesse relevées pour toute la profondeur et on les relie au déplacement de la surface. On a souvent utilisé le facteur de 0,56 pour les cours d'eau et les estuaires mais de nombreuses distributions verticales de vitesse ont été proposées[1].

3.3 Effet du vent

Plusieurs chercheurs ont fait état d'une corrélation entre la vitesse du vent et le mouvement d'une nappe d'hydrocarbures[1]. Les valeurs relevées varient entre 2 et 5 %, le mode et la moyenne étant généralement évalués à 3 %. Au vecteur vitesse vient s'ajouter la "force de Coriolis", qui est la déviation causée par la rotation terrestre. Dans l'hémisphère nord, cette force s'exerce vers la droite. La plupart des chercheurs se sont également efforcés de tenir compte de l'angle de déviation, qui varie ainsi de 0,3° vers la gauche à 13,2° vers la droite (dans l'hémisphère nord). Ces résultats donnent des écarts types très élevés de sorte qu'il n'est pas possible d'établir une règle simple pour la force de Coriolis.

es données fournies ci-dessus permettent de présenter un modèle simplifié ou schéma pour la prévision du déplacement des hydrocarbures sur l'eau (fig. 2). En fait, ces données sont les seules utilisées dans nombre de modèles simplifiés.

3.4 Effet des marées

La modélisation du déplacement des nappes dans les eaux à marée est beaucoup plus complexe que dans les eaux sans marée. Dans de nombreuses zones, la marée a pour effet de faire monter et baisser la nappe toute entière. En plus d'un comportement oscillatoire, les eaux à marée ont souvent des couches limites et des profils de température et de vitesse bien particuliers. Pour certains modèles, on s'est efforcé de prendre ces facteurs en considération mais il reste encore beaucoup à faire[1].

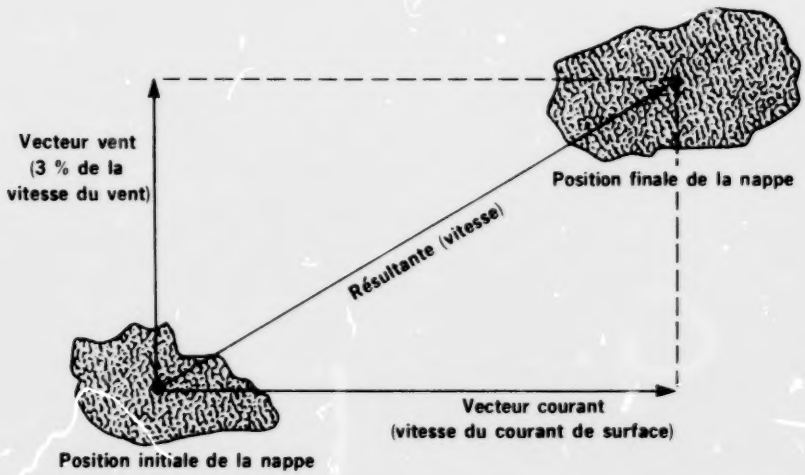

Figure 2. Schéma de la modélisation du déplacement d'une nappe d'hydrocarbures.

3.5 Effet des vagues

Plusieurs chercheurs ont remarqué que les vagues influaient sur le mouvement des hydrocarbures à la surface de l'eau. Jusqu'ici,, aucun modèle mathématique approprié n'a été mis au point pour décrire cet effet[1].

3.6 Effet des émulsions de l'eau dans les hydrocarbures

Nombre de modèles élaborés tiennent compte de la densité et de la viscosité des hydrocarbures, facteurs dont on a démontré l'influence sur l'étalement et le déplacement de la nappe. Un phénomène qui devient parfois important est la formulation d'émulsions d'eau dans les hydrocarbures, appelées couramment "mousse au chocolat", dont la densité est proche de celle de l'eau (elles sont donc plus lourdes que les hydrocarbures) et dont la viscosité est bien supérieure à celle des hydrocarbures. En cas de formation d'une émulsion, l'étalement est considérablement ralenti et l'épaisseur de la nappe (en fait la formation de concentrations ou de zones d'émulsion) varie. Aucun modèle connu des auteurs ne tient compte de ce facteur, et le processus lui-même est mal compris. En

fait, la question est très complexe étant donné que certains hydrocarbures forment des émulsions et d'autres non, de sorte qu'il faudra effectuer de longues recherches sur le processus lui-même avant de pouvoir modéliser ce phénomène.

3.7 Pertes d'hydrocarbures

Plusieurs modèles tiennent maintenant compte de la perte d'hydrocarbures par évaporation, dissolution, échouage, sédimentation, entraînement au fond, etc. On considère généralement que l'évaporation est le principal de ces facteurs. Sur une nappe expérimentale de brut léger, dans la mer du Nord, Cormack et Nichols[3] ont relevé jusqu'à 21 % de pertes dans les 7,5 premières heures. Plusieurs modèles tiennent maintenant compte de l'évaporation[1,4]. En revanche, la dissolution s'est révélée difficile à modéliser; toutefois, plusieurs chercheurs sont parvenus à la modéliser de même que la répartition des hydrocarbures dans la colonne d'eau[1,4]. L'échouage a également été modélisé[1]. Cette tâche s'est révélée relativement simple pour les modèles qui tiennent compte des conditions aux limites (littoral, hauts fonds). Le problème est que nombre de modèles qui ne tiennent pas compte de ces conditions ne sont pas réalistes et en outre ne peuvent reproduire ce qui se passe sur le littoral.

La sédimentation des hydrocarbures sur les particules peut donner lieu à des pertes considérables. Dans un film récent sur la marée noire de l'AMOCO CADIZ, Black Tide, les pertes par sédimentation ont été estimées à plus de 25 %. Jusqu'ici, on n'a guère effectué de recherches pour modéliser ce facteur[1].

3.8 Variation des paramètres

Les paramètres peuvent varier considérablement, même sur de courtes périodes. Par exemple, la vitesse et la direction d'origine des vents sont souvent régies par une distribution similaire à celle de Poisson. De la même façon, la variation des autres paramètres a été étudiée et modélisée[1].

4. MODÈLES COURANTS

La présente section a pour but de passer en revue et décrire les modèles les plus courants. Les lecteurs qui désirent une étude critique sont invités à consulter la référence 1. Il existe également des ouvrages où les modèles sont comparés de manière plus détaillée[1, 5 à 9].

4.1 Modèles d'étalement

4.1.1 Modèle de Blokker

Blokker[12, 13] a établi des relations empiriques concernant l'étalement de divers types d'hydrocarbures, celles-là se fondant sur l'hypothèse que la vitesse d'étalement

décroît de façon exponentielle à mesure que diminue l'épaisseur de la nappe.

Nappe circulaire

$$Q_t^3 - Q_o^3 = \frac{24}{\pi} K_B (SG_w - SG_o) \frac{SG_o}{SG_w} V_t \qquad (i)$$

Nappe rectangulaire

$$L_t^2 - L_o^2 = 4 K_B (SG_w - SG_o) \frac{SG_o}{SG_w} \frac{V_t}{W} \qquad (ii)$$

où:

Q_t = diamètre de la nappe au moment t (cm)
K_B = constante de Blokker (min^{-1})
(environ 30 000 pour l'essence, 15 000 pour un brut léger et 10 000 pour une huile de graissage)
t = durée du processus d'étalement (min)
V = volume des HC déversés (cm^3)
(généralement initial ou à un moment donné)
SG_o = poids spécifique des HC
SG_w = poids spécifique de l'eau
L = longueur d'une nappe rectangulaire (cm)
W = largeur d'une nappe rectangulaire (cm)
(en supposant qu'elle se trouve dans un chenal étroit et reste constante)

Le modèle de Blokker a été testé à plusieurs reprises mais les résultats ont été généralement peu probants. Jeffery[14] a réalisé une étude sur un déversement de brut léger iranien dans l'Atlantique nord. La nappe a été étudiée pendant 4 jours et on a constaté que la constante de Blokker variait par un facteur de 3.

4.1.2 Modèle de Fay

Fay[15, 16] a construit un modèle sur la base du principe que l'étalement progressif d'une masse d'hydrocarbures sur des eaux calmes est dû aux effets combinés de l'énergie potentielle de cette masse (due à la pesanteur) et la différence entre les tensions superficielles des hydrocarbures et de l'eau. Le processus d'étalement est modélisé en trois phases selon la force dominante:

a) étalement dû à la force d'inertie - la pesanteur est la force dominante

b) étalement visqueux	- l'énergie potentielle (due à la pesanteur) est dissipée en surmontant les forces visqueuses
c) étalement dû à la tension superficielle	- la tension superficielle est la force dominante qui entraîne l'étalement additionnel des hydrocarbures.

Fay a élaboré des équations tant unidimensionnelles qu'axisymétriques. Son modèle d'étalement a été beaucoup utilisé dans les modèles de déversement et a été par ailleurs testé dans des situations réelles et simulées avec des résultats généralement positifs[1]. Ce modèle est décrit plus loin dans le présent ouvrage.

Plusieurs autres modèles d'étalement ont été élaborés, nombre d'entre eux étant des variantes des modèles de Blokker et de Fay. La plupart ne sont pas beaucoup utilisés et n'ont pas été testés[1].

4.2 Modèles de déplacement

Dans la plupart des cas, c'est l'élément concernant le déplacement qui différencie les modèles. Il est conçu en fonction des différents principes relatifs au mouvement des nappes d'hydrocarbures à la surface de l'eau ainsi que des données dont les chercheurs peuvent disposer. On examine ci-après les grands types de modèles de déplacement qui ont été élaborés jusqu'ici.

4.2.1 Modèle de base non associatif

La plupart des modèles utilisent le principe de base de l'addition des vecteurs force du vent, du courant et de l'étalement tel que le montre la figure 2. Nombre de ces modèles ont été utilisés par Schwartzberg[17, 18], Wang[19], Cole[20], Bien[17] et autres[6], où:

$$X_t = \underset{a}{.03}\, W_t + \underset{b}{.56}\, C_t$$

a - On a mentionné au chapitre 3 que le facteur vent variait mais qu'une valeur moyenne de 3 % de la vitesse du vent était généralement utilisée. De nombreux chercheurs en ont adapté la valeur en fonction des zones visées par le modèle en cause. Cela se justifie par le fait que dans les endroits abrités, comme sur un cours d'eau, les vents ne sont pas mesurés à proximité de la surface de sorte qu'une valeur plus petite pour ce facteur est tout à fait appropriée.

b- le facteur 0,56 indiqué ici est celui qui est généralement utilisé par de nombreux chercheurs, pour des courants à des profondeurs de 5 m ou plus[1]. Ici encore, certains ont adapté ce facteur en fonction de leurs besoins particuliers.

L'usage de ce modèle simple de déplacement est très répandu. En plus de sa simplicité, ce modèle est très pratique en ce sens que les paramètres relatifs au vent et au courant peuvent être rapidement modifiés pour convenir aux observations réelles sur le terrain et aux données expérimentales.

4.2.2 Modèles probabilistes

Compte tenu du fait que le déplacement des hydrocarbures est un processus en partie aléatoire qui dépend d'ordinaire de leur position, plusieurs chercheurs ont employé des modèles probabilistes dont certains comprennent des périodes d'étalement[1, 21, 24]. En règle générale, ces modèles utilisent des processus stochastiques comme les séries chronologiques, la revue aléatoire et la chaîne de Markov. Nombre de ces modèles n'ont pas été vérifiés avec des déversements réels ou expérimentaux. Cette catégorie de modèles présente plusieurs inconvénients: il n'est pas possible de les relier à des processus physiques, il est difficile de les étalonner et ils requièrent de longs calculs.

5. ÉLABORATION DU MODÈLE DE DÉVERSEMENT POUR LE SAINT-LAURENT

5.1 Simulation du régime du Saint-Laurent

Pour élaborer le modèle, il était nécessaire de procéder à une analyse détaillée du régime du fleuve. La plupart des données avaient été recueillies dans le cadre d'une étude du régime du fleuve réalisée de 1974 à 1978 dans divers biefs par un groupe mixte fédéral-provincial. Pour produire les courants, on a utilisé un modèle de simulation hydrodynamique bidimensionnel mis au point par la Rand Corporation[25]. Après adaptation aux besoins de l'étude, le modèle a fourni effectivement un champ de vecteurs de la vitesse sur une grille dont la taille variait de 110 à 1 760 m. La figure 3 décrit en détail le champ de vitesses obtenu.

Pour le modèle hydrodynamique, on devait disposer des données de base suivantes: profondeurs de l'eau aux points d'intersection de la grille, niveaux de l'eau et débits aux limites ouvertes, et mesures sur le terrain aux fins d'étalonnage[26, 27, 28]. Après étalonnage de chaque bief, on a utilisé les champs de vecteurs des vitesses résultantes comme données d'entrée du modèle de déversement. Ces données ont effectivement réduit le degré d'incertitude dans les simulations de déversement étant donné qu'elles suppléaient aux forces du vent quand celles-ci étaient négligeables.

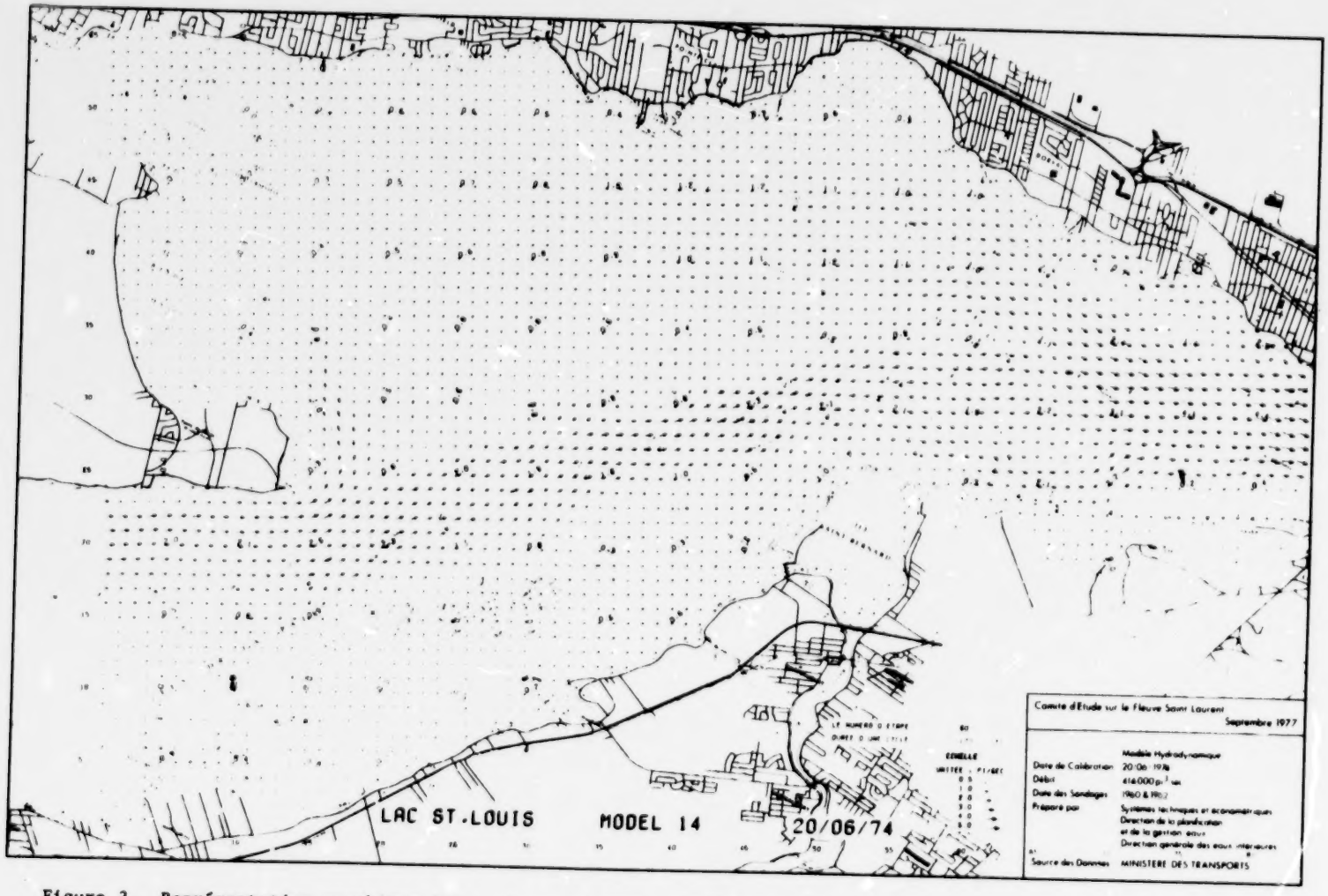

Figure 3. Représentation graphique des vecteurs vitesses dans le Saint-Laurent au lac St-Louis, le 20 juin 1974.

L'intégration des vitesses de l'eau aux données d'entrée comporte un aspect important: parmi les facteurs hydrodynamiques, on compte l'effet de Coriolis. Ceci permet d'éviter dans une large mesure les réglages angulaires que l'on doit effectuer pour divers modèles en vue d'en tenir compte.

5.2 Modèle de simulation des déversements

Les équations de base qui régissent ce modèle ont été élaborées par James A. Fay[15, 16] dans des conditions de laboratoire où les constantes théoriques jouent un grand rôle. Les chercheurs rendent ces équations et ces constantes plus précises seulement lorsqu'il est possible d'analyser en détail des déversements réels et leurs caractéristiques.

Au cours de ses recherches, Fay a élaboré des équations pour trois forces qui influent successivement sur les hydrocarbures jusqu'à la stabilisation finale de la taille de la nappe, à savoir la pesanteur, l'étalement visqueux et la tension superficielle.

5.3 Considérations théoriques du modèle de Fay

La pesanteur, force verticale agissant en premier lieu sur les hydrocarbures, se traduit par un mouvement horizontal du fait de la nature même des hydrocarbures. En s'étalant, la couche flottante crée un mouvement de déséquilibre à la surface des eaux environnantes jusqu'à ce que son épaisseur, son gradient et la différence de densité entre les hydrocarbures et l'eau aient diminué considérablement. À ce stade, la couche est encore épaisse, mais la force de gravité est nettement moins élevée. Le rayon de l'étalement bidimensionnel est donné par la formule suivante:

$$r_1 = K_{2i}\ (\Delta.G.V.t^2)^{1/4} \qquad (1)$$

Dans la deuxième phase, l'étalement se poursuit en raison du déséquilibre entre les forces à l'interface air-eau et la somme des tensions superficielles aux interfaces hydrocarbures-air et hydrocarbures-eau. La résultante (différence nette) est une force qui incite le front de la nappe à avancer. Cette force est aussi fonction de l'épaisseur de la nappe et a été qualifiée à juste titre de force d'étalement visqueux.

À partir de là, on a établi l'équation suivante:

$$r_v = K_{2v}\ (\Delta.G.V^2.t^{3/2}/\nu^{1/2})^{1/6} \qquad (2)$$

La dernière phase est caractérisée par le fait que l'épaisseur de la nappe diminue jusqu'à devenir finalement celle des molécules d'hydrocarbures et que l'énergie disponible est dissipée par la chaleur. En outre, les énergies superficielles et potentielles deviennent négligeables de sorte que la nappe s'étale encore plus.

On suppose que l'épaisseur de la nappe stabilisée est équivalente à celle de la molécule. L'équation qui régit cette phase du déversement est donnée comme suit:

$$r_t = K_{2t} (\delta^2 \tau^3 / \rho^2 \nu)^{1/4} \tag{3}$$

La superficie finale de la nappe circulaire, telle qu'estimée à partir des études de laboratoire et des observations sur le terrain, est représentée par l'équation suivante:

$$A(m^2) = 10^5 [V(m^3)]^{3/4} \tag{4}$$

Il s'agissait ensuite de déterminer le moment où chaque transition de phase a pris place. À cet effet, on a égalisé les équations (1) et (2) et on les a résolues en prenant t comme inconnue. On a procédé de la même façon pour les équations (2) et (3), et finalement pour les équations (3) et (4). On a ainsi obtenu les équations suivantes:

- transition de la phase de gravité à la phase de tension visqueuse:

$$T_{iv} = \left(\frac{K_{2v}}{K_{2i}}\right)^4 \cdot \left(\frac{V}{\Delta \cdot g \cdot \nu}\right)^{1/3} \tag{5}$$

$$R_{iv} = \left(\frac{K_{2v}}{K_{2i}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta \cdot g \cdot V^5}{\nu^2}\right)^{1/12} \tag{6}$$

- transition de la phase de tension visqueuse à la phase de tension superficielle:

$$T_{vs} = \left(\frac{K_{2v}}{K_{2t}}\right)^2 \cdot (\Delta \cdot g \cdot \nu)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho}{\delta}\right) \cdot V^{2/3} \tag{7}$$

$$R_{vs} = \left(\frac{K_{2v}}{K_{2t}}\right)^{3/2}_{1/2} \cdot \left(\rho \cdot \frac{\Delta \cdot g \cdot V^2}{\delta}\right)^{1/4} \tag{8}$$

- transition de la phase de tension superficielle à la stabilisation finale:

$$T_f = \left(\frac{R_f^4 \cdot \rho^2 \cdot \nu}{\sigma^2 K_{2t}^4}\right)^{1/3} \tag{9}$$

$$R_f = \left(\frac{10^5 . V^{3/4}}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (10)$$

En résolvant les équations susmentionnées et en utilisant les coefficients empiriques obtenus, on peut tracer un graphique qui représente l'étendue de la nappe en fonction du volume d'hydrocarbures déversés. Au tableau 1, établi à l'aide des coefficients proposés par Fay, les rayons de déversements progressivement plus grands sont montrés après une minute, et ensuite après des durées plus longues.

TABLEAU 1

SOMMAIRE DES DONNÉES GRAPHIQUES

Volume du déversement (barils de pétrole, États-Unis)

Rayons en verges - temps en minutes

Volume (barils)	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5
Rayon de la nappe après 1 minute	6,7	11,9	21,2	37,8	67,1	119,4
Durée du déversement T_{iv}	1,2	2,5	5,4	11,7	25,2	54,4
Rayon après T_{iv}	7,2	18,9	49,5	129,3	337,4	880,5
Durée du déversement T_{vs}	3,	12,	54,	250,	1163,	5397,
Rayon après T_{vs}	8,8	27,8	87,9	277,9	878,7	2778,9
Durée du déversement T_f	62,	197,	622,	1967,	6220,	19668,
Rayon après T_f	97,8	232,2	550,5	1305,6	3095,9	7341,6
Ci-dessus, $K_{2i} = 1,14$		$K_{2v} = 1,45$			$K_{2t} = 5,7$	
Durée du déversement T_{vs}	15,	71,	331,	1538,	7140,	33145,
Rayon après T_{vs}	13,8	43,7	138,3	437,4	1383,4	4374,7
Durée du déversement T_f	209,	660,	2086,	6597,	20859,	65953,
Rayon après T_f	97,9	232,2	550,5	1305,6	3095,9	7341,6
Ci-dessus, $K_{2i} = 1,14$		$K_{2v} = 1,45$			$K_{2t} = 2,30$	

Pour plus de clarté, les données montrées ci-dessus sont représentées graphiquement à la figure 4.

Il s'est agi ensuite de déterminer la vitesse de déplacement des hydrocarbures à partir du centre du déversement continu vers l'extérieur. En calculant la dérivée du rayon par rapport au temps, on a obtenu un taux de variation qui correspond à la vitesse du front de la nappe pendant un déversement. On a alors obtenu les équations suivantes:

- où $\frac{dv}{dt}$ = taux de variation de la vitesse des hydrocarbures; $\frac{dr}{dt}$ = vitesse du front.

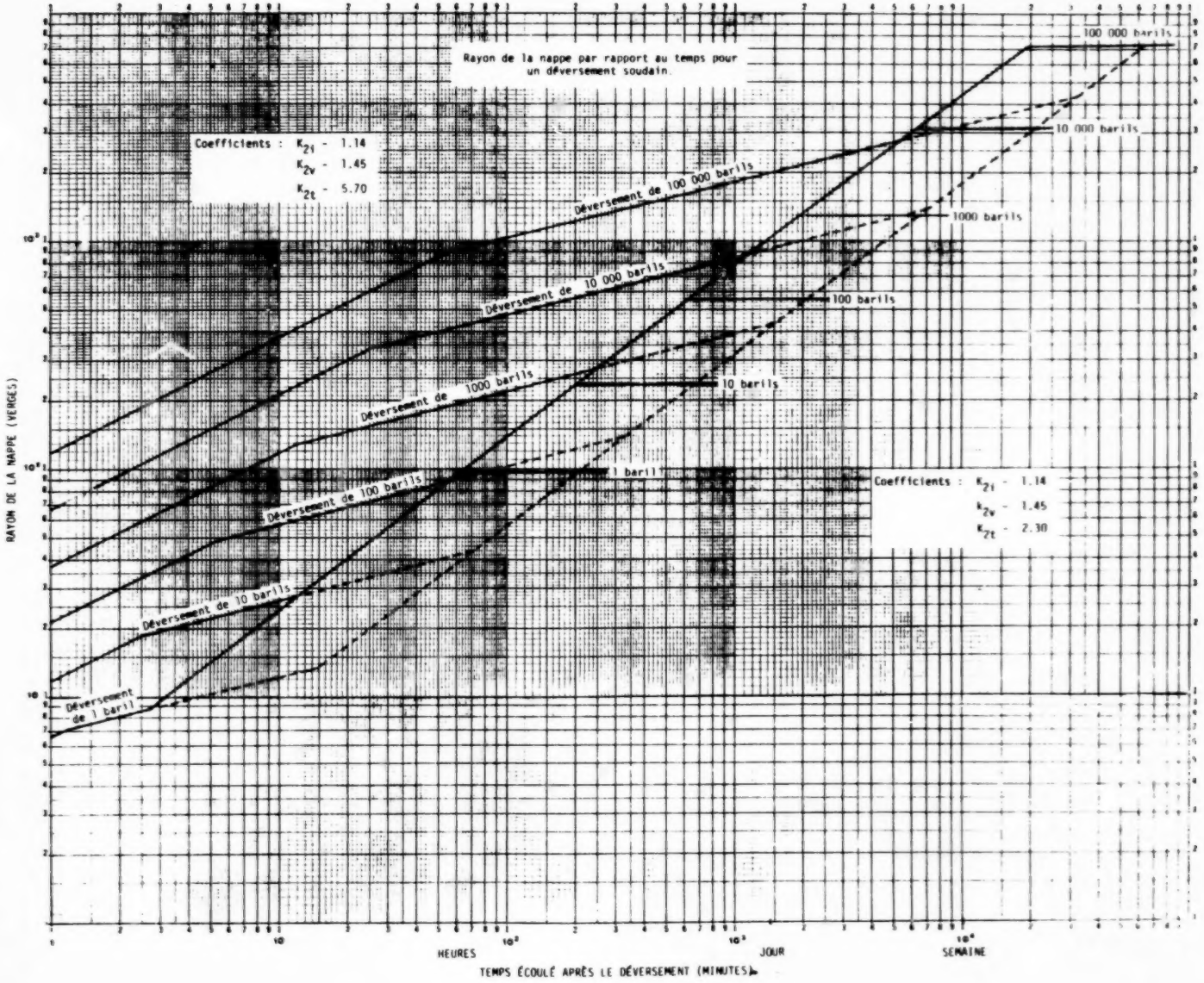

Figure 4. Rayon de la nappe par rapport au temps pour un déversement soudain.

$$\frac{dr_i}{dt} = K_{2i} \, (\Delta \cdot g \cdot)^{1/4} \cdot \left(\frac{V^{1/4}}{2t^{1/2}} + \frac{t^{1/2}}{4V^{3/4}} \cdot \frac{dv}{dt}\right) \qquad (11)$$

$$\frac{dr_v}{dt} = K_{2v} \left(\frac{\Delta \cdot g}{\nu^{1/2}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{V^{1/3}}{4t^{3/4}} + 1/3 \cdot \frac{t^{1/4}}{V^{2/3}} \cdot \frac{dV}{dt}\right) \qquad (12)$$

$$\frac{dr_t}{dt} = K_{2t} \left(\frac{\delta^2}{\rho^2 \nu}\right)^{1/4} \cdot \frac{3}{4t^{1/4}} \qquad (13)$$

Une fois que l'on a estimé le volume déversé par rapport au temps, on peut évaluer la vitesse du front de la nappe.

On constatera que, moyennant de simples opérations, il est possible d'utiliser ces formules pour les déversements issus de sources fixes ou contenus dans des limites fixes comme les rivages et les quais.

Si par exemple, il se produit un déversement à partir d'un quai, la nappe n'occupera qu'une surface équivalente à un demi-cercle pour un même volume déversé. On peut alors diviser de la même façon le volume d'hydrocarbures par la réduction de la superficie circulaire pour tenir compte de cette situation.

On appliquerait alors la relation simple ci-après:

$$V \propto V \; / \; (100\text{-}\% \text{ de la superficie réduite}) \qquad (14)$$

5.4 Comment le modèle représente-t-il le volume déversé?

Dans le modèle, les hydrocarbures sont représentés par un certain nombre de points qui correspondent chacun à un certain volume. Le nombre maximum de points est actuellement fixé à 1 000. Cela signifie que pour un déversement de 100 000 barils, chaque point vaudra 100 barils.

En assignant à chaque point une valeur donnée, on peut déterminer à tout moment le volume des hydrocarbures déversés. À l'aide du modèle, on calcule l'espace occupé par chaque point en vue de déterminer la distance minimum que devra parcourir la nappe avant d'entrer en contact avec la rive du fleuve ou tout autre obstacle.

Pendant toute la simulation, chaque point représente toujours le même volume. La nappe diminue parce que les hydrocarbures se déposent sur la rive ou se fixent dans de petites baies ou des chenaux étroits. Les pertes par évaporation, vieillissement et autres facteurs ne sont pas modélisées.

Par la suite, on utilise chaque point du système, s'il représente encore un certain volume d'hydrocarbures, pour déterminer le centre de gravité (C de G) de la nappe entière. Après chaque phase, on assigne à chaque point une direction à partir du centre de gravité et on calcule sa vitesse. En outre, on superpose sur la nappe une grille mobile à cases plus petites. On calcule ensuite le nombre de points contenus dans chaque case en vue de déterminer si les hydrocarbures peuvent se déplacer dans le sens désigné.

Dans des conditions normales, un point ne peut passer dans une case contenant une plus grande quantité d'hydrocarbures que sa case d'origine. En d'autres termes, les hydrocarbures occupant une zone donnée peuvent s'opposer aux forces agissant sur le point. Ceci réduit les possibilités de voir les hydrocarbures se déplacer de telle façon que la taille de la nappe s'en trouverait réduite, sauf s'il s'agit d'un mouvement provoqué par des forces encore plus grandes comme le vent ou les courants.

5.5 Effets des rives ou des limites existantes

Les rives sont capables d'absorber des hydrocarbures à raison d'un certain volume prédéterminé par unité de longueur. Aux fins du modèle, on considère que la rive est composée d'une "clôture de piquets" continue et chaque piquet entrant en contact avec un "point d'hydrocarbures" peut en retenir une quantité donnée.

Pour commencer, on convertit tous les renseignements relatifs à la côte en données numériques et on réunit les coordonnées terre-eau dans un fichier. À partir de ce fichier, on établit ensuite un autre fichier contenant des renseignements relatifs aux limites pour une case donnée. Tous les points de la rive sont examinés, les coordonnées intermédiaires étant insérées entre les coordonnées numériques à intervalles réguliers. Normalement, ces coordonnées "intermédiaires" ne sont pas espacées de plus de 30,5 mètres. Les points d'hydrocarbures, auxquels on assigne un rayon (avec un minimum donné), au moment "t", ne peuvent pas franchir cette clôture.

De cette façon, on vérifie chaque point qui pénètre dans un carré contenant une limite terre-eau pour savoir si:

1. son rayon est en contact avec un piquet et,
2. les hydrocarbures représentés par le point peuvent être absorbés en totalité par la rive (et retirés par conséquent du système).

Si la rive est saturée d'hydrocarbures, le point doit y rester jusqu'à ce que d'autres conditions l'éloignent de la limite.

Dans le contexte décrit ci-dessus, il est possible d'adopter une méthode plus réaliste pour résoudre les problèmes complexes posés par la rive.

5.6 Effets aléatoires utilisés dans le modèle

De tels effets ont été intégrés aux programmes sur la vitesse du vent et de l'eau, sur la base des erreurs générales escomptées pour les mesures effectuées sur place.

Dans le sous-programme "vent", on a calculé les composantes du vent en faisant varier la direction du vent de façon que la distribution des fréquences de la direction des points forme une courbe naturelle de distribution. Cette courbe a comme propriété de restreindre la variation à plus ou moins un radian et une probabilité de 18 % seulement de faire tomber en dehors des limites d'un demi-radian.

Pour l'eau, les vecteurs de vitesse pouvaient chacun varier de façon aléatoire d'un maximum de plus ou moins 10 % comme décrit ci-dessus. Le dépassement d'un intervalle de plus ou moins 5 % relève d'une probabilité de 18 %. On suppose que cet intervalle se trouve dans la marge d'erreur normalement acceptée par ceux qui effectuent les mesures sur place.

5.7 Simulation d'un déversement dans le port de Montréal

Pour cette simulation, on a supposé que des hydrocarbures avaient été déversés par un navire ancré près d'un quai de Montréal-Est, à 220 mètres environ de la rive nord. Il s'agissait de 2 860 barils de Bunker C, répandus à débit constant pendant une demi-heure. On a considéré que le déversement s'était produit pendant un jour calme et qu'il n'y avait pas de vent. Dans ces conditions, les forces en présence étaient seulement l'étalement des hydrocarbures et la vitesse de l'eau.

On a calculé les données hydrodynamiques pour un débit de 6 655 m^3/s, et le modèle a été étalonné pour le 21 octobre 1964. La vitesse de l'eau variait entre 0 et 0,3 m/s le long de la rive sud et entre 0,67 et 1,2 m/s dans le chenal de navigation. Les débits sont représentés graphiquement à la figure 5.

Sur les figures 6 à 9, qui montrent l'évolution de la nappe toutes les 15 minutes, on peut voir que les hydrocarbures atteignent la rive nord au bout d'une demi-heure environ et que l'étalement se poursuit sous l'effet conjugué des courants. On peut constater aussi que la vitesse plus faible des eaux de la zone située au nord du chenal principal tend à y provoquer un étalement "en éventail".

Grâce à cette simulation, il est possible de calculer le temps de déplacement, d'identifier les zones les plus susceptibles d'être polluées et d'évaluer le temps qui sera nécessaire pour une intervention dans le cas de nappes descendant rapidement le fleuve.

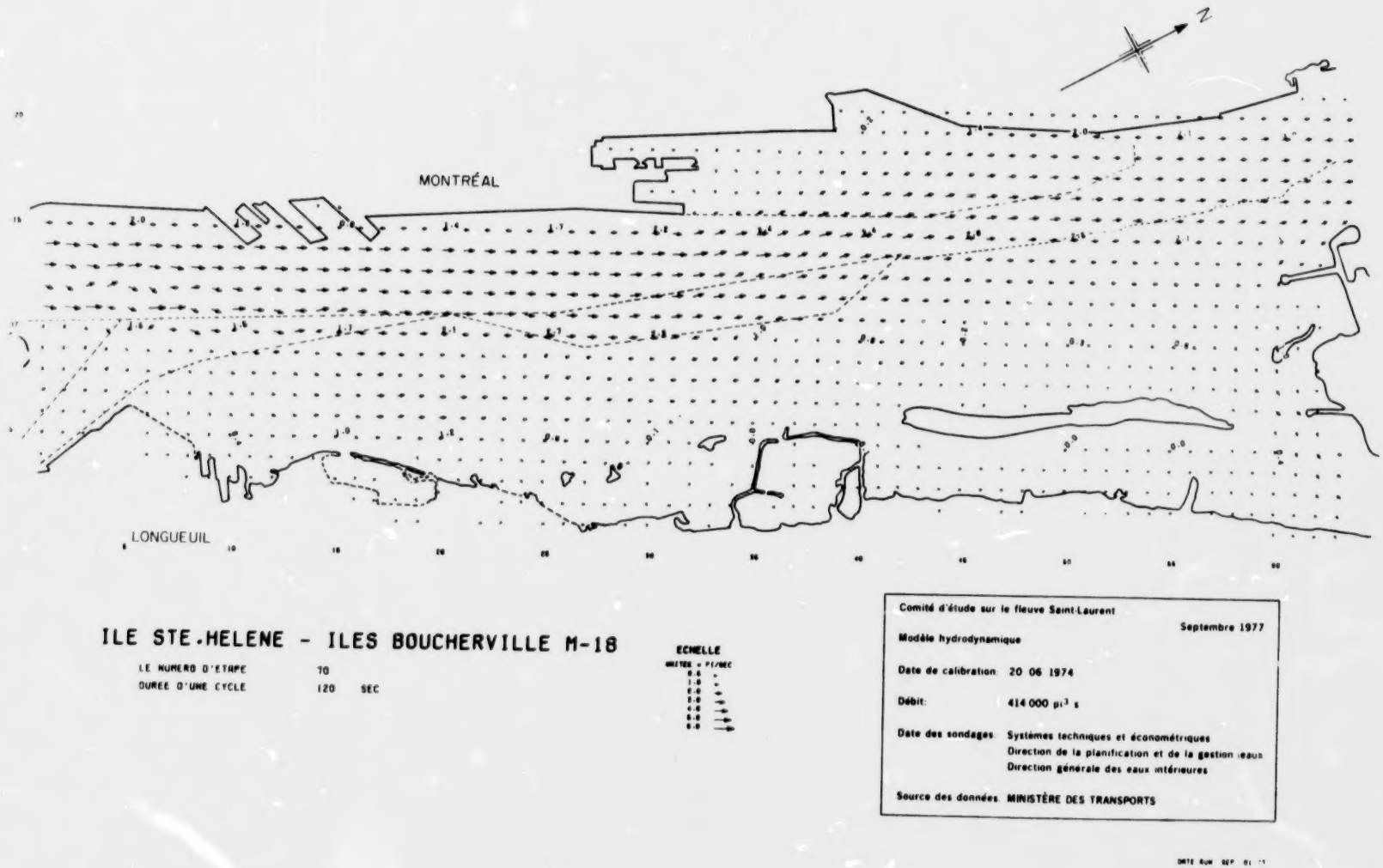

Figure 5. Représentation graphique des vitesses dans le Saint-Laurent au port de Montréal.

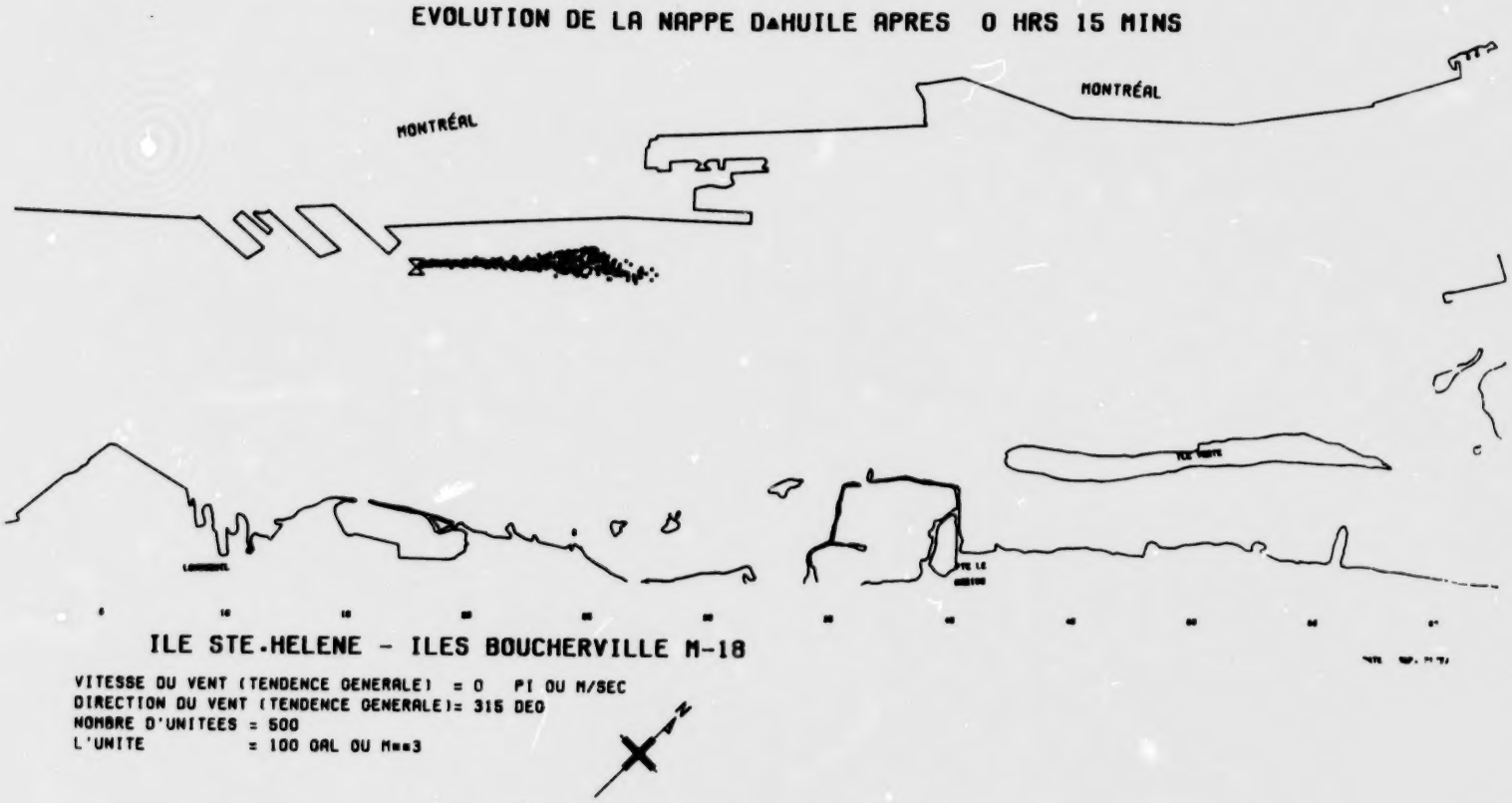

Figure 6. Déplacement après 15 minutes d'un déversement d'hydrocarbures dans le port de Montréal.

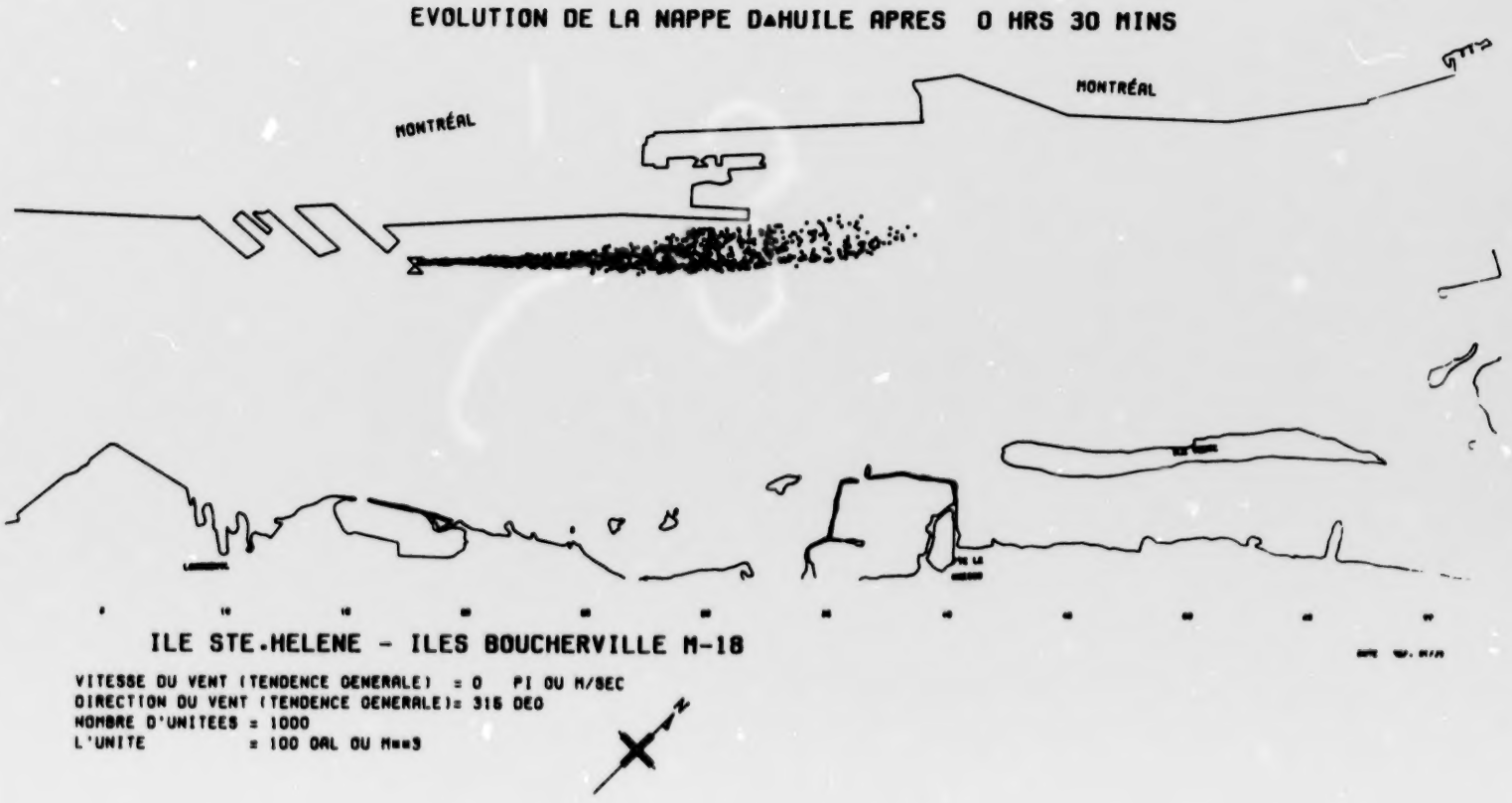

Figure 7. Déplacement après 30 minutes d'un déversement d'hydrocarbures dans le port de Montréal.

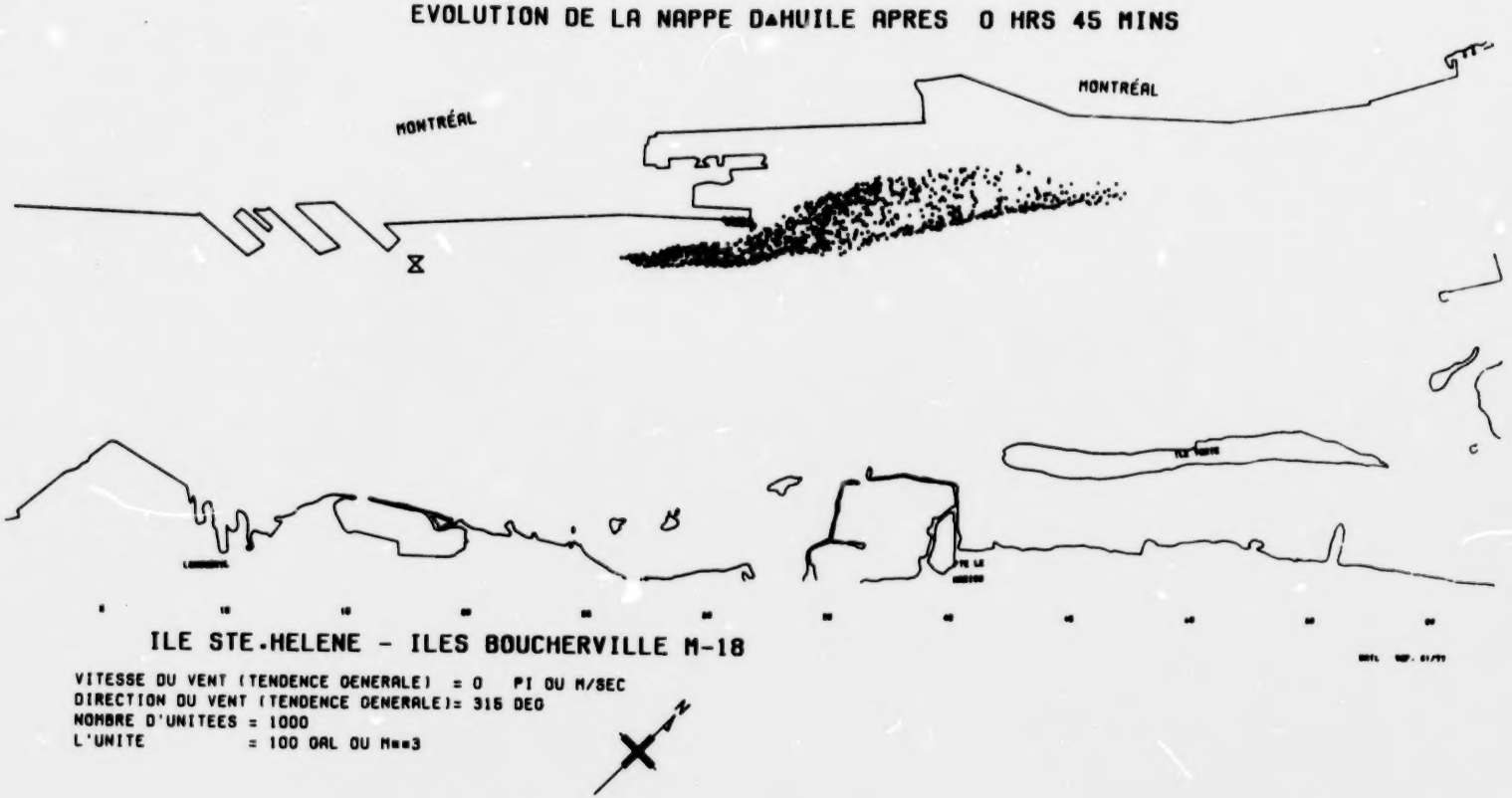

Figure 8. Déplacement après 45 minutes d'un déversement d'hydrocarbures dans le port de Montréal.

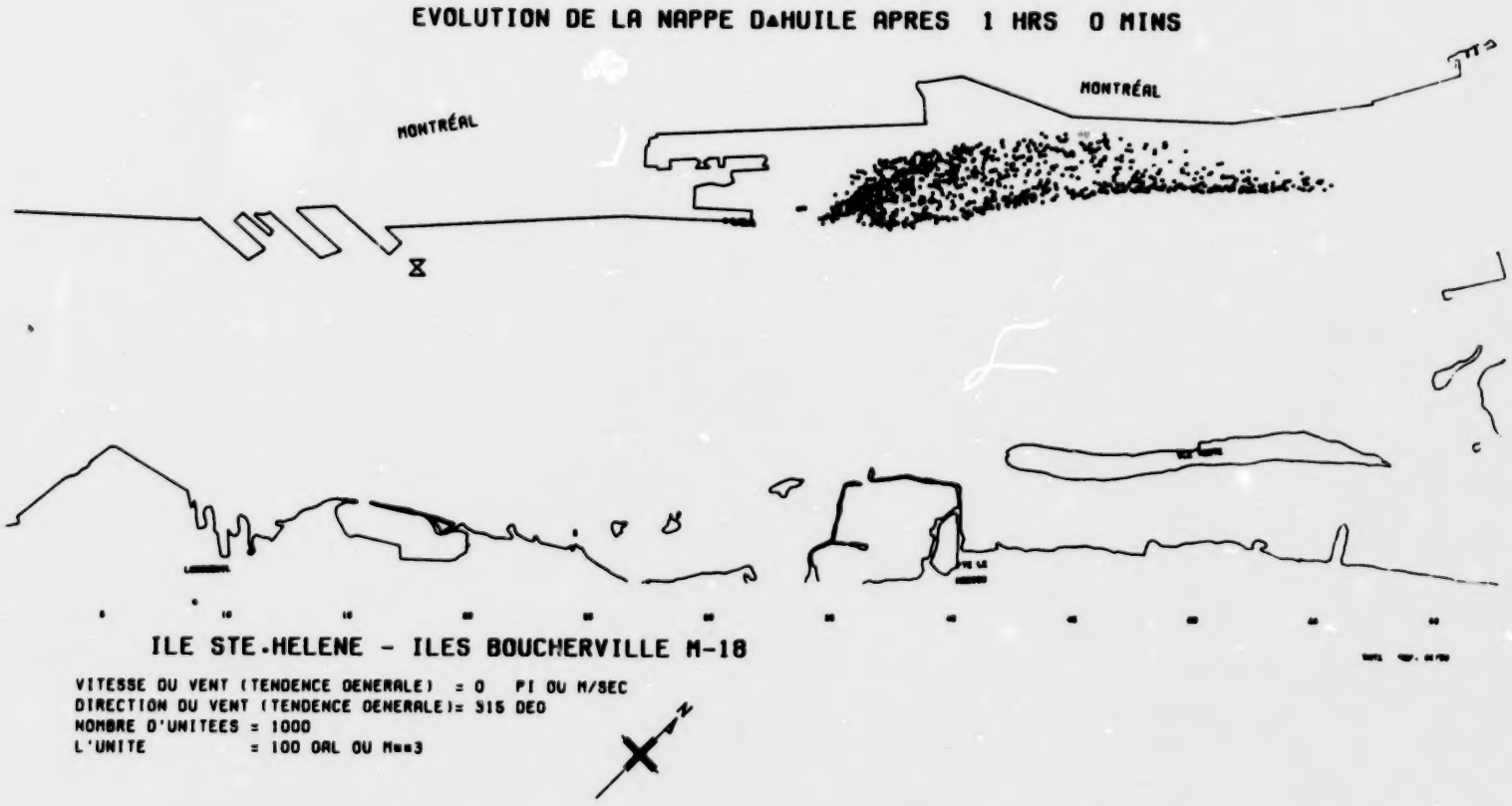

Figure 9. Déplacement après 1 heure d'un déversement d'hydrocarbures dans le port de Montréal.

4.8 Résultats et conclusions

Sous sa forme actuelle, ce modèle représente un progrès important dans la recherche d'une technique perfectionnée pour la simulation des déversements d'hydrocarbures et des exercices de dépollution. Il a été programmé d'une manière souple, qui permet l'introduction des facteurs d'évaporation et de dissolution. On peut également le modifier pour fournir des renseignements détaillés sur la direction et la vitesse d'une nappe d'hydrocarbures, données qui sont essentielles au responsable du nettoyage sur place, surtout lorsqu'on ne peut effectuer des observations sur le terrain. Dans un tel cas, il pourrait entrer directement en communication avec l'ordinateur par téléphone.

Pour utiliser le modèle il faut disposer de données météorologiques relatives au lieu du déversement, que ce soit en temps réel ou sous forme de prévisions. À cette fin, il est nécessaire de disposer d'un réseau officiel de communication avec les responsables locaux du Service de l'environnement atmosphérique en vue d'obtenir des données météorologiques courantes pour certains points du fleuve en cas d'urgence. Ces données sont vitales pour toute simulation en temps réel et doivent être adaptées aux conditions de la rive qui pourraient influer sur la direction ou la force des vents à la surface des eaux libres.

Jusqu'ici, les résultats de la simulation promettent beaucoup, mais il faudra perfectionner encore le système, notamment au moyen de recherches permanentes sur le terrain. Une fois que le système sera bien mis au point, on pourra fournir à l'utilisateur un modèle dont il pourra se servir avec toute confiance. L'objectif final des concepteurs est de mettre au point un tel modèle et de promouvoir son utilisation dans toutes les applications pratiques.

6. RÉFÉRENCES

1. J.D. Stolzenback, O.S. Madsen, E.E. Adams, A.M. Pollack et C.K. Cooper. A Review of Basic Techniques for Predicting the Behaviour of Surface Oil Slicks. Pour la National Oceanic and Atmospheric Administration, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1977.

2. M. Fingas. "Evaluation of an Oil Spill Tracking Buoy", Spill Technology Newsletter, vol. 2, n° 1 (1977).

3. D. Cormack et J.A. Nichols. "The Concentrations of Oil in Sea Water Resulting from Natural Chemically Induced Dispersion of Oil Slicks", Proceedings of the 1977 Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, Washington, D.C.

4. D. Mackay et P.J. Leinonen. Mathematical Model of the Behaviour of Oil Spills on Water with Natural and Chemical Dispersion. Pour le Service de la protection de l'environnement, Ministère des Pêches et de l'Environnement, Ottawa, Ontario. 1977.

5. W. Bien. Modelling Oil Slick Movement. Rapport non publié, Service de la protection de l'environnement, Ministère des Pêches et de l'Environnement, Ottawa, Ontario. 1975.

6. M.H. Fallah et R.M. Stark. Literature Review: Movement of Spilled Oil at Sea, MTS Journal. 10,3 (1976). Marine Tech. Soc.

7. W. Bien. Modelling Petroleum Spills at Supertanker Ports. Thèse pour licence ès lettres non publiée, université de Toronto, 1973.

8. P.K. Paj et A.S. Kalelker. Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook. United States Coast Guard Technical Report CG-O-65-74. (1974).

9. D.P. Hoult (Réd.) Oil on the Sea. Plenum Press. 1969.

10. Oil Spill Modelling. (Comptes rendus d'un séminaire tenu à Toronto, les 7 et 8 novembre 1978). Institute of Environmental Studies, université de Toronto.

11. J.H. Milgram, R.G. Donnelly, R.J. Van Houten et J.M. Camperman. Effects of Oil Slick Properties on the Dispersion of Floating Oil into the Sea. Pour le United States Coast Guard, Washington, D.C. 1978.

12. P.C. Blokker. "Spreading and Evaporation of Petroleum Products on Water", Proc. Fourth International Harbour Conference, Antwerp, Belgium. 1964, pp. 911 à 919.

13. P.C. Blokker. "Die Ausbreitung Von OL Auf Wassen", (L'étalement des hydrocarbures sur l'eau), Dtsch. Gewaesserkd. Mitt. 10,1112 (1966).

14. P.G. Jeffery. "Large-Scale Experiments on the Spreading of Oil at Sea and its Disappearance by Natural Factors", Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, Washington, D.C. 1973.

15. J.A. Fay. "The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea", Oil on the Sea. D.P. Hoult, Réd. Plenum Press. 1969, pp. 53 à 63.

16. J.A. Fay. "Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface", Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, Washington, D.C. 1971, pp. 463 à 467.

17. H.G. Schwartzberg. "Spreading and Movement of Oil Spills", Water Pollution Con. Res. Report, 150-80-EPL 04/70. 1970.

18. H.G. Schwartzberg. "The Movement of Oil Spills", Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, Washington, D.C. 1971, pp. 489 à 494.

19. S. Wang. A Numerical Model for Simulation of Oil Spreading and Transport and its Application for Predicting Oil Slick Movement in Bays. Tetra Technical Report n° TT-P-345-74-1. 1974.

20. C.R. Cole, H.P. Foot et J.R. Eliason. Oil Spill Drift Forecasting Model. Battelle Pacific Northwest Laboratories, Washington. 1973.

21. M.A. Tayfun et H. Wang. "Monte Carlo Simulation of Oil Slick Movements", ASCE J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div. 99-309 (1973).

22. T.S. Murty, T.J. Simons, K. Beal, G.S. Beal et A. El-Shaarawi. A Proposed Operational Model for Predicting the Movement of Oil in Canadian Navigable Waters. Rapport du Ministère des Pêches du Canada. 1975.

23. D.K. Shukla et R.M. Stark. "Random Movement of Oil Patches", The SCI of the Total Environment, 3,117 (1974).

24. M.H. Fallah et R.M. Stark. "Random Drift of an Idealized Oil Patch", J. Ocean Engineering, (1976).

25. J.J. Leendertse. Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation.

26. Surveyer, Nenniger & Chenevert Inc., Carrier, Trottier, Aubin. Hydrodynamic Simulation Model, le 31 mars 1973.

27. D. Prandle et H.L. Crookshank. Numerical Model Studies of the St. Lawrence River.

28. Anonyme. Calibration en crue du modèle hydrodynamique dans la région de Montréal, Etude d'aménagement de la ressource eau, Région de Montréal, Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des Eaux, 1974, Rapport A-2.0.2.

29. H.L. Crookshank. Containment of Oil Slicks on the St. Clair and Detroit Rivers.

30. D.L. Wilkinson. Confinement des nappes d'huile dans le Saint-Laurent.

31. J. Ploeg et D. Prandle, déc. 1972. Stage-Discharge Study St. Lawrence River Montreal to Ile d'Orleans.

32. H.L. Crookshank. Numerical Simulation of Float Movements in the Vicinity of Orleans Island.